

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Уральский государственный педагогический университет»
Институт физики, технологии и экономики
Кафедра физики и математического моделирования

Исследование скорости и затухания ультразвука в металлах и сплавах

Выпускная квалификационная работа

Квалификационная работа
допущена к защите
Зав. кафедрой

Исполнитель:
Багласова Екатерина Сергеевна,
студентка группы БФ-42

дата

подпись

подпись

Научный руководитель:
Попель Пётр Станиславович,
доктор физико-математических наук,
профессор

подпись

Екатеринбург 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ.....	5
1.1. Классическая теория распространения ультразвука	5
1.2. Обзор основных методов измерения акустических параметров жидких сред.....	9
1.3. Основные трудности измерения акустических параметров.....	18
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	23
2.1. Импульсно-фазовый метод.....	23
2.2. Методика проведения измерений.....	30
2.3. Источники и оценка экспериментальных погрешностей.....	31
2.4. Модернизация.....	33
ГЛАВА 3. ОБУЧЕНИЕ ШКОЛЬНИКОВ ФИЗИКЕ ЧЕРЕЗ ПОГРУЖЕНИЕ В НАУЧНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.....	41
3.1. Содержание методики.....	41
3.2. Реализация методики.....	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	52

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент основные теории жидкого состояния вещества построены для идеальных жидкостей со сферически симметричными, неполярными частицами. Из числа реальных веществ, которые близки по этим условиям можно назвать инертные газы и жидкие металлы. Поэтому исследование физических свойств жидких металлов и сопоставление экспериментальных данных с теоретическими представлениями играет важную роль в дальнейшем развитии теории, что делает работу в этом направлении весьма **актуальной**.

Большое количество работ посвящено изучению вязкости, электропроводности жидких металлов, а также исследованию их структуры дифракционными методами. Важной характеристикой является и сжимаемость, которая может быть определена из экспериментальных данных о скорости звука. Зная этот параметр, мы можем определить коэффициент Пуассона, изотермическую сжимаемость и длинноволновые пределы структурных факторов, являющиеся мерой флуктуаций плотности и концентрации. К сожалению, подобных исследований пока опубликовано немного, что можно объяснить экспериментальными трудностями осуществления акустических экспериментов.

В данной работе описаны установка для исследования скорости ультразвука импульсно-фазовым методом, которая была спроектирована и изготовлена в 1989 г. С.Г.Кимом.

В последнее время возникла проблема ее модернизации, что и определило постановку следующих **задач исследования**:

- 1) ознакомиться с имеющимися методиками измерений акустических параметров;
- 2) изучить теоретические основы импульсно-фазового метода и устройство экспериментальной установки, действующей в НИЦ «Расплав» Института физики, технологии и экономики УрГПУ;

- 3) восстановить и модернизировать основные узлы установки;
- 4) провести измерения скорости ультразвука в ряде жидких металлов;
- 5) проанализировать результаты измерений и оценить их погрешность.

Конечной **целью** указанной модернизации является подготовка экспериментальной установки к Государственной аттестации.

ГЛАВА 1. ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

1.1. Классическая теория распространения ультразвука

Ультразвук – это механические колебания, частота которых лежит выше области частот, слышимых человеческим ухом (обычно 20 кГц) [2]. Ультразвуковые колебания распространяются в форме волны, подобно распространению света. Однако в отличие от световых волн, которые могут распространяться в вакууме, для распространения ультразвука необходима упругая среда (газ, жидкость или твердое тело), деформация которой пропорциональна приложенной силе [5].

Интенсивное развитие ультразвуковой акустики стало возможным только с разработкой в начале XX века способов генерации и приема упругих высокочастотных колебаний. Это связано с появлением разнообразных радиотехнических устройств и открытием пьезоэлектрического эффекта. Благодаря малости длины ультразвуковых волн (от долей миллиметра до нескольких сантиметров), появилась возможность изучать с помощью акустических методов различные среды – газы, жидкости, твердые тела - не встречая при этом сложностей в поддержании частоты, температуры, давления и прочих условий, необходимых для соблюдения чистоты эксперимента. Так появилась перспектива использовать достижения акустики для решения задач молекулярной физики, а именно для изучения строения изучаемых сред и происходящих в них явлений, обусловленных молекулярным движением. Произошло интенсивное сближение акустики и молекулярной физики, приведшее к возникновению на их стыке новой науки – молекулярной акустики [45].

Вначале для интерпретации экспериментальных результатов привлекали классическую теорию распространения звука. Но после

обнаружения дисперсии параметров, описывающих этот процесс, т.е. их зависимости от частоты, появились новые теории. К счастью, для жидких металлов, полупроводников и полуметаллов дисперсия параметров оказалась несущественной. Поэтому распространение ультразвука в них с хорошей точностью может быть описано в рамках классической теории.

В механике сплошной изотропной среды для одномерного случая распространения плоской продольной волны механического возмущения в сжимаемой вязкой среде записывается следующая замкнутая система уравнений линейной акустики:

Уравнение движения:

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (1)$$

Уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \quad (2)$$

Реологическое уравнение состояния

$$f = E \frac{\partial U}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \quad (3)$$

Уравнение состояния

$$\delta P = \frac{1}{\beta_T} \frac{\delta \rho}{\rho} + \frac{\alpha_T}{\beta_T} \delta T \quad (4)$$

Уравнение энергии

$$c_v \delta T - \frac{T \alpha_T}{\beta_T \rho^2} \delta \beta_T = 0. \quad (5)$$

Здесь ρ – плотность, U – смещение частицы, f – напряжение, E – эффективный модуль ($E = k + \frac{4}{3\mu}$, где k – модуль всестороннего сжатия, т.е. характеристика способности вещества сопротивляться всестороннему сжатию, μ – модуль сдвига), T – температура, η – эффективная вязкость, P – давление, β_T – изотермическая сжимаемость, α_T – температурный коэффициент расширения, c_v – теплоемкость при постоянном объеме.

В 1845г. Стокс, исходя из этой системы уравнений и предположения об отсутствии объемной вязкости, которая возникает в сжимаемых жидкостях и газах, вывел следующие уравнение распространения упругой волны в сжимаемой вязкой среде

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - v_s^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{4\eta'}{3\rho} \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t} = 0 \quad (6)$$

где v_s – адиабатическая фазовая скорость распространения волны, которая, из соотношения Лапласа, равна:

$$v_s^2 = \frac{1}{\beta_s \rho} \quad (7)$$

Будем рассматривать случай плоской гармонической волны, распространяющейся вдоль оси x с затуханием вследствие потерь из-за вязкости. Решением уравнения (6) будет:

$$U = U_0 e^{-\alpha x} \cos(\omega t - kx)$$

где ω – циклическая частота, k – волновое число, α – амплитудный коэффициент поглощения (коэффициент поглощения на единицу длины).

Подставляя значение U из (8) в (6) получаем

$$k^2 - \alpha^2 = \frac{\omega^2 v_s^2}{v_s^4 + \frac{16\eta'^2 \omega^2}{9\rho^2}} \quad \text{и} \quad 2\alpha k = \frac{\frac{4\eta' \omega^2}{3\rho}}{v_s^4 + \frac{16\eta'^2 \omega^2}{9\rho^2}}.$$

Пренебрегая членом $\frac{16\eta'^2 \omega^2}{9\rho^2} \ll v_s^4$, Стокс вывел следующее соотношение для амплитудного коэффициента поглощения звука

$$\alpha = \frac{2\eta' \omega^2}{3\rho v_s^3}. \quad (9)$$

Кирхгоф указал, что поглощение звука может быть вызвано не только вязкостью, но и теплопроводностью среды, дополнив систему уравнений линейной акустики уравнением теплопроводности

$$T \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{\kappa \partial^2 T}{\rho \partial x^2}, \quad (10)$$

где S – энтропия, κ - коэффициент теплопроводности. Так как процесс распространения акустических волн является адиабатическим, температура жидкости вдоль ее объема непостоянна. Поэтому будет осуществляться перенос энергии из мест с высокой температурой в места с низкой

температурой. С учетом введенной поправки уравнение (9) записывается в виде:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho v_s^3} \left[\frac{4}{3}\eta' + \kappa \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right]$$

или

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho v_s^3} \left[\frac{4}{3}\eta + \kappa \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right] \quad (11)$$

c_V и c_P - удельные теплоемкости при постоянных объеме и давлении, соответственно.

Соотношение (11) известно как формула Стокса-Кирхгофа. Соотношение Лапласа (7) и формула Стокса-Кирхгофа (11) представляют результаты классической теории распространения звука.

Уже по виду выражений для скорости распространения (7) и коэффициента поглощения (11) звука ясно, что они зависят от параметров среды. В формуле Стокса-Кирхгофа (11) не рассмотрены величины удельных теплоемкостей и коэффициент теплопроводности. По своему определению теплоемкость отражает структуру вещества и движения молекул в нем, т.е. относится к структурно-чувствительным свойствам.

Физический смысл коэффициента теплопроводности κ (из закона Фурье) состоит в том, что эта величина равна удельному тепловому потоку при единичном градиенте температур [45]. Прохождение теплового потока зависит от строения вещества. Таким образом, все величины в правой части уравнения (11): $\rho, v_s, \eta, \kappa, c_V, c_P$ – являются структурно-чувствительными характеристиками вещества. Следовательно, коэффициент поглощения является структурно-чувствительным параметром распространения упругой волны.

Кроме скорости распространения и коэффициента поглощения, которые являются первичными параметрами распространения упругой волны, производные этих параметров по факторам равновесия (давление,

температура, состав) можно рассматривать как вторичные параметры. А именно:

$$\left(\frac{1}{v_s} \frac{\partial v_s}{\partial P}\right)_{T,X}; \left(\frac{1}{v_s} \frac{\partial v_s}{\partial T}\right)_{P,X}; \left(\frac{1}{v_s} \frac{\partial v_s}{\partial X}\right)_{P,T} \text{ и } \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial P}\right)_{T,X}; \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)_{P,X}; \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial X}\right)_{P,T},$$

где X – состав.

Рассмотренные вторичные параметры распространения упругих волн являются физическими свойствами среды, они отражают изменение характера межатомного взаимодействия при тепловом и химическом воздействиях.

1.2. Обзор основных методов измерения акустических параметров жидких сред

Основные принципы в разработке экспериментальных методов исследований металлических жидкостей позаимствованы у специалистов в области органической химии [9]. При исследовании жидких металлов существуют ограничения, которые связаны со спецификой образцов. В частности, их оптическая непрозрачность исключает использование оптических методов измерения акустических параметров. Высокие температуры существования жидких металлов и сплавов вынуждают использовать звукопроводы, которые одним концом погружались бы в расплав, а другим – в систему принудительного охлаждения.

Методы измерения скорости распространения звука обычно подразделяют на прямые и косвенные [3]. К прямым относят методы, основанные на измерениях длины и времени пробега звукового импульса в образце. Скорость определяют из выражения:

$$v_s = \frac{h}{t}, \quad (12)$$

где h и t – соответственно длина и время прохождения звукового импульса.

К косвенным методам относят исследования, основанные на измерениях длины волны и частоты звука.

Скорость звука в этом случае определяется:

$$v_s = \lambda f. \quad (13)$$

К настоящему времени разработано и создано множество методик, основанных как на прямых, так и на косвенных методах измерения. Развиваются оба метода без определенной тенденции в развитии. Поэтому в данной работе автор полагает рациональным, рассматривать развитие технологий исследований в хронологическом порядке.

В 1925 г. Пирс в США, используя разработанный им точный метод измерения скорости и поглощения ультразвука в газах (известный ультразвуковой интерферометр Пирса), обнаружил в углекислом газе заметную дисперсию звука (зависимость фазовой скорости волн от частоты) и аномальное поведение коэффициента поглощения в зависимости от частоты [8].

Интерферометр Пирса еще называют интерферометром с одним преобразователем. Это можно объяснить тем, что в основе его работы лежит принцип интерференции двух волн: излучаемой преобразователем и отраженной от подвижного рефлектора.

Типичный ультразвуковой интерферометр (рис.1) представляет собой акустическую камеру 1 с исследуемой средой, в которой пьезоэлектрическим преобразователем 2 возбуждаются ультразвуковые волны. На некотором расстоянии l от пьезопреобразователя расположен плоский рефлектор 5, от которого отражается волна. Он может перемещаться вдоль направления распространения ультразвука.

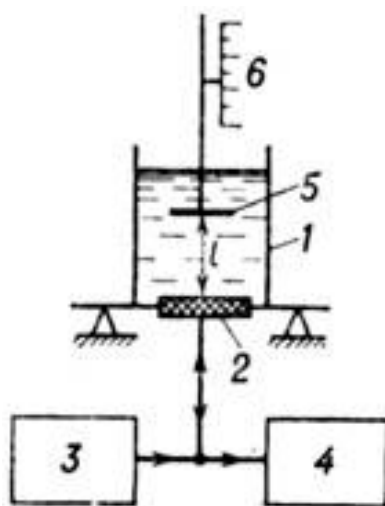


Рис.1. Блок-схема интерферометра, где 1 – акустическая камера, 2– пьезопреобразователь, 3 – генератор высокочастотного напряжения, 4 – схема регистрации, 5 – рефлектор, 6 – отсчетный механизм

Плоскости рефлектора и пьезопреобразователя устанавливаются строго параллельными друг к другу. Акустическое поле в камере интерферометра рассматривается как поле плоских волн, которые многократно отражаются от рефлектора и поверхности преобразователя. Однако это справедливо при условии, что поперечные размеры преобразователя и рефлектора значительно больше длины ультразвуковой волны. Реакция преобразователя на акустическую нагрузку определяется по величине электрического напряжения U на нём (преобразователь возбуждается генератором тока). Величина U , при перемещении рефлектора, периодически изменяется от максимального до минимального значения с периодом $\lambda/2$, где λ – длина ультразвуковой волны в исследуемой среде. Искомая скорость ультразвука определяется как $v_s = \lambda f$ (f - частота), а коэффициент поглощения может быть найден либо по спаду экстремумов кривой реакции (рис.2) с увеличением l , либо по их ширине.

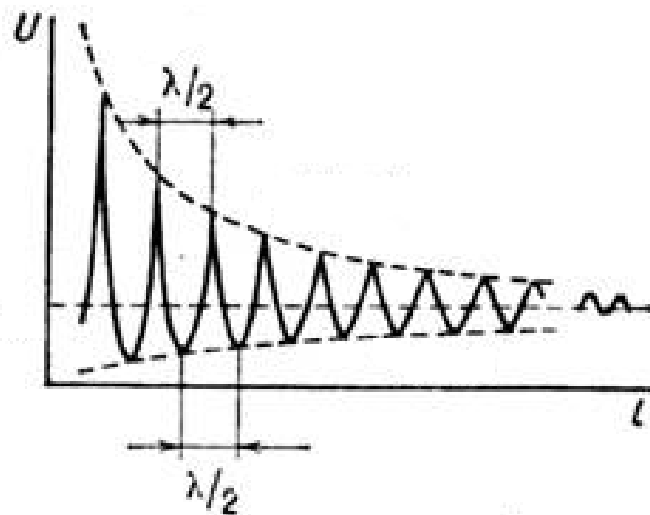


Рис. 2. Кривая реакции - зависимость напряжения U на пьезопреобразователе от расстояния l между рефлектором и пьезопреобразователем

Основным источником систематической погрешности в данном методе является отличие реальных условий измерений от условий, отвечающих распространению плоской волны вдоль оси камеры. При несоблюдении условия малости длины волны относительно размеров камеры, преобразователя и рефлектора в интерферометре возникают дифракционные эффекты искажающие результаты измерений. При непараллельности рефлектора и преобразователя, а также при неравномерности распределения амплитуд и фаз колебаний скорости по поверхности преобразователя на кривой реакции $U(l)$ возникают дополнительные экстремумы и изменяются интервалы между основными экстремумами [6-7].

В литературе [6] и [7] указаны минимальные погрешности измерения скорости ультразвука, которые составляют 10^{-4} - 10^{-6} . Погрешность измерения коэффициента поглощения на частотах мегагерцевого диапазона - $(2-20) \cdot 10^{-2}$. Авторы указывают, что для исключения дифракционных погрешностей необходимо вводить поправки, корректный расчёт которых может быть выполнен численными методами.

Интерференционный метод приобрел максимальное распространение при изучении акустических параметров твердых тел. С этого времени в большом количестве проводятся экспериментальные и теоретические работы

по исследованию дисперсии и поглощения ультразвуковых волн в газах, а затем в жидкостях [10]. К настоящему времени накопилось очень большое количество работ по измерению скорости и поглощения ультразвука в газах, жидкостях, растворах, электролитах, проведенных при разных физических условиях (температура, давление, плотность, фазовые переходы и т. д.). Результаты этих измерений важны не только для изучения молекулярных свойств газов и жидкостей, но они широко используются и в технике для контроля протекания различных технологических процессов по изменению скорости и поглощения звука.

Оригинальную методику разработали Выюгов и Гуменюк [8]. Они использовали классический метод звукового интерферометра с одним звукопроводом и перемещающимся рефлектором. В качестве звукопровода использовали стержень из того же материала, что и образец. В данном исследовании был решен вопрос акустического контакта. Но недостатком является то, что измерения можно проводить только в очень узком интервале температур вблизи температуры кристаллизации расплава. Авторы оценивают погрешность измерений в 0,2-0,3 % [1].

Рядом авторов [18-21] использовался также акустический интерферометр с непрерывным излучением, который обладает простой конструкцией и высокой точностью. Авторами (В.И.Илгунас и Э.П.Яронис) излучающий пьезоэлемент был установлен непосредственно на жидкий металл. К сожалению, это привело к уменьшению интервалов температур, доступных для исследования.

Импульсный метод впервые использован Пелламом и Галтом в США и Ноздревым, Кошкиным и Яковлевым в СССР (рис.3).

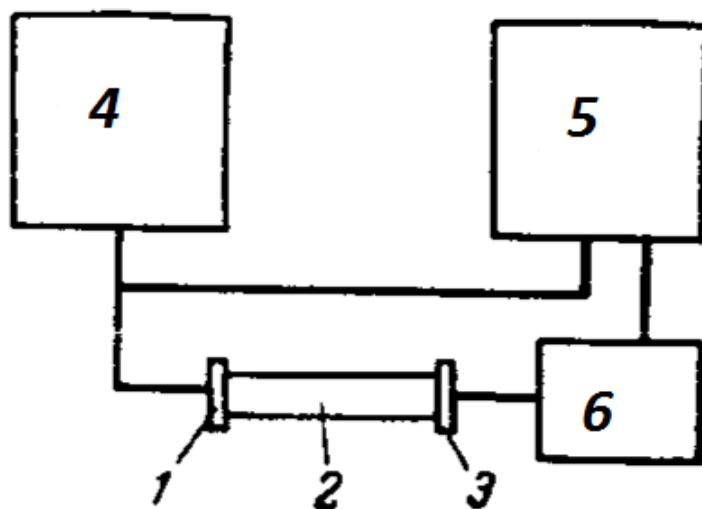


Рис.3. Блок-схема измерения скорости ультразвука импульсным методом:

1-пьезокристалл; 2-образец; 3-приемный пьезокристалл; 4-генератор.

Исследование проходит следующим образом. Кварцевый преобразователь периодически излучает в исследуемую среду ультразвуковые импульсы, которые, пройдя через эту среду, преобразуются в электрические сигналы. Можно использовать преобразователь и рефлектор или применять два преобразователя. Поглощение звука определяется по уменьшению амплитуды принимаемого импульса при увеличении акустической длины пути. Скорость звука находится непосредственно путем измерения времени запаздывания данного импульса. В практике измерений акустических параметров импульсным методом применяют два способа его реализации: способ переменного расстояния и способ фиксированного расстояния [14].

Нецелесообразно применять импульсный метод с фиксированным расстоянием, так как измерения не будут обладать высокой точностью. Такой метод может быть использован в основном для измерений абсолютных значений скорости звука при фиксированной температуре. Исследование же

в широких интервалах температур вызывает сложности, так как изменения скорости звука при повышении температуры будут лежать в пределах ошибок измерений.

Применение перемещающегося рефлектора (или второго волновода) позволяет исключить неточности, которые связаны с малыми различиями формы импульсов, отраженных от поверхности стержня и рефлектора.

Некоторые авторы использовали импульсный метод сравнения, в котором прямое измерение времени прохождения ультразвука в расплаве заменялось сравнением его со временем прохождения в эталонной ячейке, заполненной жидкостью с хорошо известной скоростью звука (обычно использовалась ртуть или вода) [4].

Большое распространение получил фазовый метод измерения скорости звука (рис.4). В этом методе сравниваются фазы двух сигналов: прошедшего через исследуемую среду и опорного. Для его реализации используются как непрерывные, так и импульсные колебания. Сравнение фаз может производиться в акустическом (на пьезопреобразователе), или в электрическом (в измерительном приемнике) трактах. Для регистрации разности фаз между сигналами можно использовать осциллограф, фазовый вольтметр или фазометр.

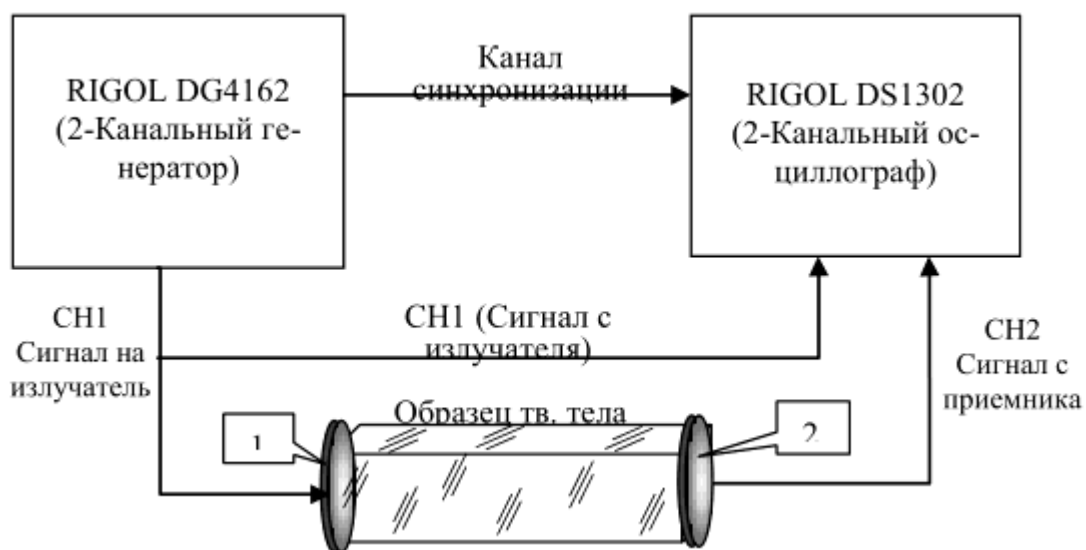


Рис.4. Блок-схема установки для измерения скорости акустических волн фазовым методом: 1-излучающий преобразователь; 2-принимающий преобразователь

Байдов, Гитис, Дымов, Кунин, Михайлов разработали вариант реализации импульсного метода изменения скорости звука – так называемый импульсно-фазовый метод. Метод основан на наблюдении электрической интерференции импульса с высокочастотным заполнением. Отмечают, что основная проблема – это проблема смачивания звукопроводов исследуемыми расплавами [2]. Подробнее данный метод описан во второй главе.

Гитис, Михайлов, Химуниин разработали установку с использованием метода электроакустической обратной связи с целью работы в более широком интервале температур. В этом методе использовали два неподвижных звукопровода. Импульс, посланный в изучаемую среду, принимается, усиливается и поступает на задающий генератор, синхронизируя его работу. Таким образом, измерение времени заменяется измерением частоты повторения импульсов. В установке предусматривается несколько режимов работы: на просвет и на отражение в каждом из волноводов.

Скорость звука определяется по формуле

$$c = \frac{2df_1f_2}{2f_1f_2 - f_1 - f_2}$$

где d – расстояние между торцами стержней, f – частота повторения импульсов в системе стержни-расплав, f_1 и f_2 – частота повторения импульсов в каждом стержне. Погрешность измерений оценивали в 1,5-3,5 % [3]. Однако при использовании этого метода возникали значительные трудности из-за наличия многократно отраженных импульсов в стержнях, которые вместе с рабочим импульсом поступают на задающий генератор и срывают его синхронизацию. Этот эффект уменьшали за счет подрезания торцов стержней таким образом, чтобы торцы были не перпендикулярны оси [4].

Авторы впервые обнаружили аномальную температурную зависимость распространения звука в расплаве. В их работах заложена основа

молекулярной акустики жидких полуметаллов и полупроводников. До открытия Гитисом и Михайловым явления роста скорости распространения звука в плотных средах подобная аномалия была известна только у воды и считалась ее специфической особенностью. Они также впервые измерили скорость распространения звука в жидких сере и селене.

В 2002 году Тетериным Е.П., Тарасовым И.Е. и Потехиным Д.С. запатентована установка для измерения скорости ультразвука в жидких средах (Патент RU 2193760). Устройство (рис. 5) содержит пьезопреобразователь 1, цилиндр 2, заполненный жидкостью, и поршень-отражатель 3, помещенный в жидкость и расположенный коаксиально цилиндру 2, соленоид 4, связанный с выходом источника питания 5, который соединен с управляющим выходом ЭВМ 6. ЭВМ соединена с выходом аналого-цифрового преобразователя 7, который подключен к усилителю 8. Усилитель выведен к амплитудному детектору 9, который соединен с пьезопреобразователем 1 и выходом генератора высокой частоты 10.

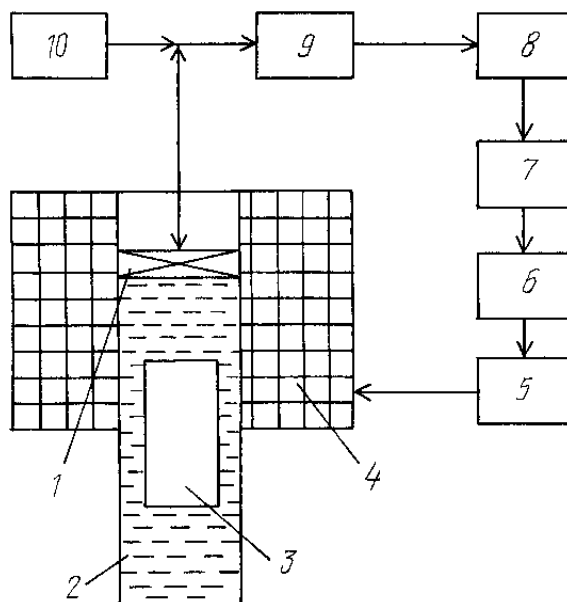


Рис. 5. Блок-схема устройства, реализующего предлагаемый способ

Способ определения скорости ультразвука заключается в том, что в жидкую среду с помощью пьезопреобразователя излучают и принимают

ультразвуковую волну, отраженную от торца поршня-отражателя, движущегося в жидкости.

Метод отличается тем, что поршню-отражателю сообщают неравномерное движение на фиксированном расстоянии L . В течение всего времени движения поршня непрерывно определяют величину доплеровского смещения частоты $F(t)$ отраженной ультразвуковой волны, которая излучается пьезопреобразователем в жидкую среду. Скорость ультразвука c определяют из выражения

$$c = \frac{2fL}{\int_0^t F(t) dt},$$

где $\int_0^t F(t) dt$ - площадь фигуры, ограниченной кривой $F(t)$ и осью времени t на временном интервале от нуля до t движения поршня-отражателя на фиксированном расстоянии L ; f - частота излучаемой ультразвуковой волны.

Погрешность авторы оценивают в 0,36% [13].

1.3. Основные трудности измерения акустических параметров

Главные проблемы связаны с прохождением звукового сигнала по акустическому тракту, для которого необходимо удовлетворить ряд взаимоисключающих требований. В частности, нужно обеспечить качественный акустический контакт материала звукопровода и исследуемого образца и при этом нельзя допускать взаимодействия материалов с образцом, так как в результате будет нарушена чистота эксперимента (образец будет загрязнен).

Основная проблема некачественного контакта заключается в слабости связей между образцом и звукопроводом на атомно-молекулярном уровне.

Поскольку в распространении звуковой волны участвуют все частицы среды, то есть, возмущения передаются от атома к атому посредством межатомных связей, отсутствие таковых предотвращает их дальнейшее распространение. Химическая связь между твердым волноводом и жидкостью должны быть слабыми, в противном случае будет наблюдаться их взаимное растворение. Слабые связи возникают при смачивании жидкостями поверхностей инородных твердых тел. Жидкие металлы, полупроводники и полуметаллы плохо смачивают поверхности диэлектриков, которые могут служить хорошими материалами для звукопроводов ввиду незначительности поглощения ими звука и химической стойкости. Некоторые исследователи для того, чтобы улучшить акустический контакт, в качестве промежуточного слоя использовали воск, парафин, минеральные масла. Однако при исследовании высокотемпературных жидких металлов и сплавов эти вещества по понятным причинам применять нельзя. Следовательно, для решения проблемы акустического контакта необходим тщательный подбор материала волноводов и промежуточного слоя.

К материалу для создания промежуточного слоя между волноводом и исследуемым металлом предъявляются следующие требования:

1. Химическая инертность по отношению к жидким металлам, полуметаллам и полупроводникам при высоких температурах.
2. Стерильность (чистота на уровне полупроводниковой).
3. Технологичность (простота нанесения и удаления).
4. Хорошая смачиваемость поверхностей твердых тел и расплавов.
5. Невысокая температура плавления и пренебрежимая испаряемость.
6. Способность сохранять стабильный акустический контакт после затвердевания (для исследований легкоплавких металлов, полуметаллов и полупроводников).

Этим требованиям наиболее полно удовлетворяет стеклообразный борный ангидрид. Он применяется в технологии полупроводников при выращивании чистых монокристаллов из расплавов в качестве флюса,

поэтому удовлетворяет первым двум требованиям. Нанесение расплавленного борного ангидрида на поверхность волновода не представляет проблем. Он легко удаляется теплой водой, смачивает практически все твердые тела и расплавы металлов, полуметаллов и полупроводников. Температура плавления борного ангидрида сравнительно невысока (около 723 К), а давление насыщенных паров составляет около 20 мм. рт. ст. при 2000 К [54]. По-видимому, жидкий борный ангидрид растворяет окисные пленки расплавов. Испытания авторов показали, что после затвердевания смачивание его расплавами металлов сохраняется, а сцепление с кварцем, достигнутое ещё в жидком состоянии, таково, что попытка удалить промежуточный слой борного ангидрида после охлаждения до комнатной температуры механическим путем часто заканчиваются поломкой волноводов. При его нанесении на темную окисленную поверхность нержавеющей стали через некоторое время поверхность приобретает металлический блеск, что свидетельствует о растворении металлического окисла в жидком борном ангидриде. Опыты показали, что применение этого соединения в качестве промежуточной среды повышает пропускную способность акустического тракта на 3-4 порядка.

В методе, используемом в нашей лаборатории, в качестве материала звукопровода и ячеек используется плавный кварц. Для подавляющего большинства жидких полуметаллов и полупроводников плавный кварц химически инертен. Его удобно использовать в качестве конструкционного материала благодаря его технологичности и доступности, а главное – незначительному поглощению энергии звукового импульса.

Однако данный материал является диэлектриком. Для осуществления электрического контакта с металлической обкладкой пьезопреобразователя было необходимо металлизировать охлаждаемый конец звукопровода. Это удалось сделать методом ультразвуковой пайки. На торцевую и определенную часть боковой поверхности при температурах выше точки плавления индия (429 К) ультразвуковым паяльником наносили его тонкий

слой. После охлаждения лишние слои индия удалялись механическим путем. Вся обрабатываемая поверхность после этих операций остается покрытой тонкой пленкой индия с зеркальным блеском, которую удалить полностью механическим путем практически невозможно. Для качественного контакта пьезообразователи прижимали к торцу звукопровода через прослойку вакуумного масла.

Еще с большими трудностями связано измерение коэффициента поглощения звука в жидких металлах. Это связано как с необходимостью охлаждения волноводов, так и с еще более жесткими требованиями к надежности акустического контакта, поскольку его нестабильность искажает результаты измерений. Известно, что коэффициент поглощения звука в жидких металлах очень мал, поэтому для наблюдения заметного ослабления сигнала приходится существенно увеличивать длину акустического пути, а вместе с этим и размеры измерительной кюветы и, следовательно, необходимые количества исследуемого расплава. Увеличение акустического пути приводит к резкому возрастанию систематических погрешностей из-за дифракции, вследствие которой ослабление звукового сигнала становится соизмеримым с потерями вследствие «истинного» поглощения. Поэтому для измерения затухания ультразвука в металлических расплавах используются высокие частоты. Авторы подчеркивают, что в данном случае наиболее подходящим материалом для волноводов является плавленый кварц, так как этот материал обладает малым собственным поглощением звука [51].

Таким образом, проблема акустического контакта является сдерживающим фактором в постановке акустических опытов. Из-за данной проблемы возникают противоречия в результатах измерения одних и тех же акустических параметров различными авторами. При слабом и нестабильном выходном рабочем сигнале измерения затруднительны и расчетная погрешность измерений из реальной становится скорее желательной.

Основные выводы к 1 главе:

1. На основе анализа литературы показана, что скорость ультразвука является структурно-чувствительным параметром;
2. Систематизирована информация об основных методах измерения скорости ультразвука в расплавах;
3. Описаны трудности, с которыми приходится сталкиваться экспериментатору во время подготовки и проведения экспериментов.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

2.1 Импульсно-фазовый метод

Как уже указывалось в первой главе, этот метод впервые был разработан Байдовым, Гитисом, Дымовым, Куниным и Михайловым [4]. Он основан на наблюдении электрической интерференции импульсов с высокочастотным заполнением. Авторы использовали импульсный интерферометр, в котором сигнал, прошедший через расплав и усиленный приемником, складывался с опорным синусоидальным напряжением. При определенных условиях (равенство амплитуд и противоположность фаз) суммарный сигнал равен нулю. При перемещении волновода через каждую длину волны ультразвука в образце наблюдаемая картина повторяется. Преимуществом данного метода является то, что здесь добавочные отраженные импульсы не мешают работе, так как все измерения проводятся с первым пришедшим импульсом. Относительная погрешность измерений составляет 0,2%. Недостатком является необходимость изменения длины, что вызывает значительные конструктивные трудности в условиях больших температур и необходимости сохранения герметичности рабочего объема [4].

Принципиальная блок-схема установки, созданной и собранной в 1989 году С.Г. Кимом [16], представлена на рис. 6.

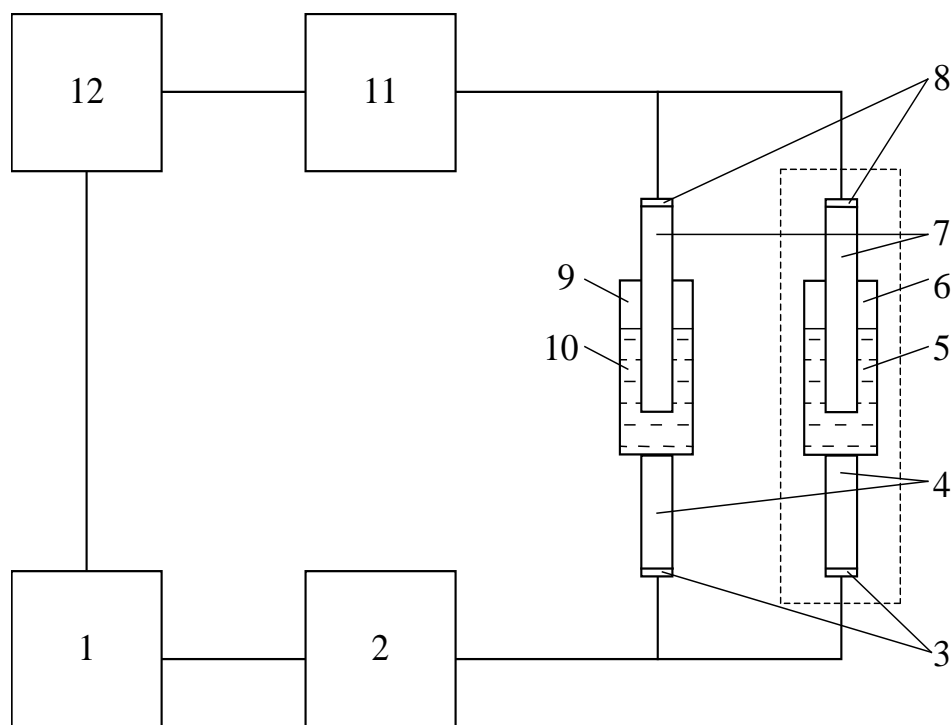


Рис. 6. Блок-схема установки:

1 - генератор импульсных сигналов, 2 - генератор синусоидальных сигналов, 3 и 8 – пьезоэлементы, 4 и 7 – волноводы, 5 – исследуемый образец, 6 – контейнер для исследуемого образца, 9 – контейнер для эталонной жидкости, 10 – эталонная жидкость, 11 – селективный усилитель, 12 – осциллограф

Генератор Г5-72 (1) вырабатывает прямоугольные импульсы длительностью 1 – 5 мкс и частотой следования около 2 кГц. Эти импульсы заполняются высокочастотным синусоидальным напряжением, снимаемым со стандартного генератора Г4-143 со встроенным синхронизирующим частотомером (2). Амплитуду импульсов можно плавно регулировать от 0 до 1,2 В. Данные импульсы подаются на излучающие пьезоэлементы (3) измерительной ячейки с исследуемым образцом (6) и эталонной ячейки с дистиллированной водой (ячейка сравнения) (9). Пьезоэлементы изготовленные из пьезокерамического поликристаллического материала, преобразуют энергию электрических колебаний в энергию механических и наоборот. Полученный в пьезоэлементе (3) акустический сигнал проходит через нижний неподвижный волновод (4), исследуемый расплав (5) в контейнере (6), верхний подвижный волновод (7) и поступает на приемный

пьезоэлемент (8). Подобные преобразования сигнала происходят и в эталонной ячейке (9). Эталонная ячейка представляет собой линию задержки в виде стержня из того же материала, что и волноводы (плавленный кварц). Она подсоединена параллельно к измерительной ячейке, закреплена на подвесе и расположена на рабочем стенде. В контейнер этой ячейки залита дистиллированная вода, термостатируемая при комнатной температуре. Необходимо приравнять длины линий задержек измерительной ячейки и ячейки сравнения, регулируя акустическую базу последней. Добившись наложения обоих сигналов, волноводы ячейки сравнения фиксируют и в дальнейшем на протяжении всего эксперимента они остаются неподвижными.

Сигналы с измерительной и ячейки сравнения после обратного пьезоэлектрического преобразования в пьезоэлементах (8) подаются на селективный приемник (11), где отсеиваются помехи. Далее сигналы поступают на осциллограф С1-77 (12).

В качестве пьезопреобразователей (и излучающего, и приемного) используются круглые пластины диаметром 5 мм и толщиной 0,36 мм из ЦТС – керамики, обладающей наилучшими электромеханическими параметрами среди других пьезокерамических и прочих пьезоэлектрических материалов. По сравнению с кварцевыми пьезопреобразователями, она отличается широкими резонансными полосами и меньшими напряжениями возбуждения. При амплитуде входных колебаний напряжения более 0,5 В в них возбуждаются достаточно мощные механические колебания. Резонансная частота используемых пьезоэлементов - 33,1 МГц.

Как указывалось выше, времена задержки обеих ячеек подбираются примерно одинаковыми, поэтому передаваемые по цепи электрические сигналы интерферируют и результат их интерференции после усиления в (11) наблюдается на экране осциллографа (12). Расстояние между ближайшими максимумами и минимумами соответствуют длине ультразвуковой волны.

Зная с хорошей точностью частоту, мы можем рассчитать скорость звука по формуле:

$$v_s = \lambda f$$

где λ – длина волны, f – частота.

Верхний волновод рабочей ячейки подвижен. Перемещая его при измерении вдоль вертикальной оси (перемещение измеряется микрометром), мы изменяем сдвиг фаз сигналов измерительной и эталонной ячеек. На осциллографе наблюдаются интерференционные погасания суммарного сигнала. Процесс измерения заключается в подсчёте n – числа «схлопываний» суммарных импульсов, которых много из-за малости длин волн, при перемещении верхнего звукопровода измерительной ячейки на расстояние Δh .

Длина волны тогда рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{\Delta h}{n}$$

где n -число интерференционных минимумов укладываемых на длине Δh .

Тогда скорость ультразвука

$$v_s = \frac{\Delta h}{n} f$$

– эта величина соответствует среднему значению скорости ультразвука в прилежащем к торцу верхнего волновода слое исследуемой жидкости толщиной Δh . Именно возможность измерять практически локальные значения скорости ультразвука в различных частях расплава является уникальной отличительной чертой импульсно-фазового метода.

Приведенную на рис. 6 схему легко адаптировать к измерению амплитудного коэффициента поглощения ультразвука α . Для этого необходимо лишь отключить от генераторов ячейку сравнения, и тогда на экране осциллографа будет наблюдаться сигнал, который проходит через исследуемый образец. Этот метод основан на измерении амплитуды

звукового сигнала при увеличении длины акустического пути. Коэффициент поглощения определится по формуле

$$\alpha = -\frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{A_2}{A_1}$$

где A_1, A_2 – амплитуда сигнала при различных расстояниях x_1 и x_2 .

Следует заметить, что данный метод при существенном временном разрыве (до 5-6 часов) между измерениями амплитуд для одной и той же температуры, был совершенно не приемлем в случае отсутствия контроля за работой генераторов 1, 2 и приёмника 9 (рис.7). Поэтому целесообразно при помощи эталонной ячейки осуществлять контроль работы электрического тракта, поддерживая постоянную амплитуду эталонного сигнала в течение эксперимента. Данный метод по надёжности не уступает абсолютному методу измерения коэффициента поглощения звука, а по точности превосходит его [45].

На рисунке 7 показан вертикальный осевой разрез установки. Для придания жёсткости всей конструкции, узлы установки находятся на трёх стойках 2 (третья стойка во избежание затемнения на рисунке не показана). Положения стоек фиксируются снизу основанием 25, а сверху – диском 1.

Рабочая камера состоит из:

- фланца 21 с вводами для нижнего звукопровода, откачки и напуска газа и протягивания термопар;
- двух водоохлаждаемых токоподводов 19 и 20;
- бокового водоохлаждаемого кожуха 14
- верхнего фланца 12 с вводом для верхнего звукопровода.

Между составными частями рабочей камеры предусмотрены герметизирующие прокладки из вакуумной резины. Камера устанавливается между платформами 11 и 22. Выравнивание конструкции производится с помощью трёх винтов на платформе 11, которыми прижимается верхний фланец. Перемещение верхнего звукопровода 13 осуществляется

микрометрическим винтом 5, который крепится на платформе 6. Регистрация этого перемещения производится индикаторным микрометром 3, который установлен на платформе 4.

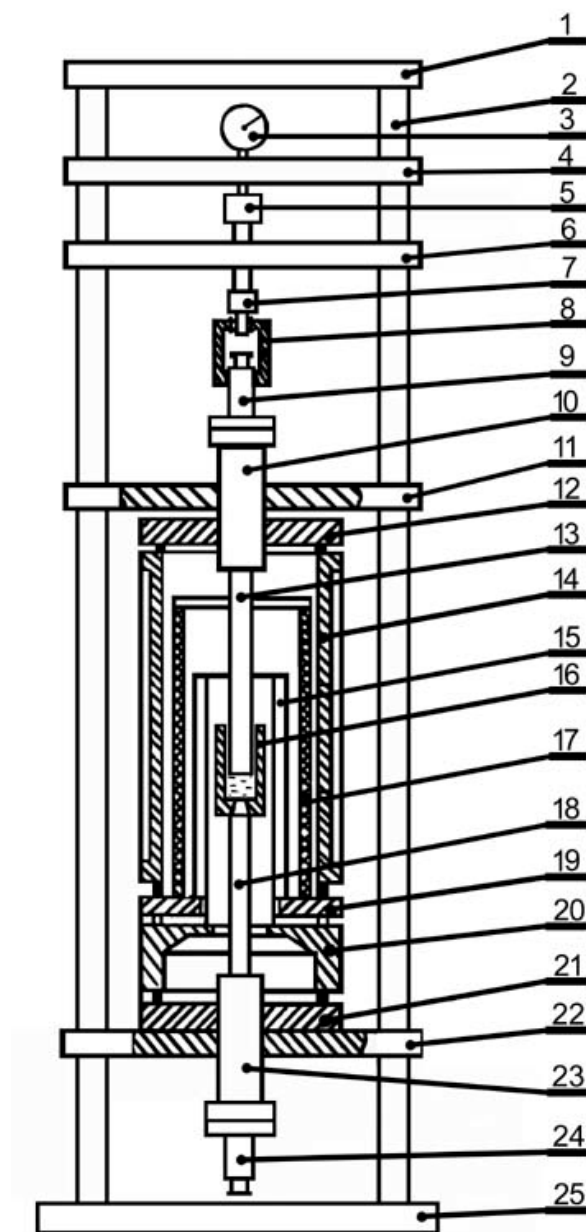


Рис. 7. Вертикальный осевой разрез аппарата для высокотемпературных и высокочастотных исследований акустических параметров расплавов

Звукопроводы 13 и 18 зажимаются в двустенные холодильники-держатели 10 и 23 с помощью конусных зажимов и резиновых уплотнений. В холодильники-держатели ввинчиваются волноводы 9 и 24 специальной

конструкции. Исследуемый образец помещается в контейнер 16, который соединен с нижним звукопроводом.

Для достижения высоких температур используется нагреватель 15 из графита в форме двух трубок, токи по которым текут в противоположных направлениях. Последнее обстоятельство исключает возможность возникновения переменных магнитных полей, которые могут внести погрешности при исследованиях проводящих расплавов. Наружная и внутренняя трубки нагревателя укрепляются на соответствующие тоководы 19 и 20. Во избежание существенных тепловпотерь, используются экраны с теплоизолирующей набивкой 17.

Температура контролируется двумя термопарами, рабочие концы которых вводятся в специальные гнезда на контейнере. Для перемещения верхнего звукопровода в волновод 9 ввинчивается муфта 8 с прорезями для вывода высокочастотного кабеля. К этой муфте шарикоподшипниковым сочленением укрепляется гнездо 7, в котором закрепляется штырь микрометрического винта.

Нагрев образца осуществлялся бифилярным графитовым нагревателем, который питался понижающим трансформатором мощностью 20 кВт. Максимальная рабочая температура нагревателя составляла 1500 К. Необходимая температура в рабочей зоне нагревателя раньше задавалась с помощью программируемого прецизионного терморегулятора РИФ-101 и контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, горячий спай которой был укреплен в непосредственной близости от нагревателя. Позднее данная система была заменена на силовые блоки МБТ1Ф160Т2 (производитель «Термодат»), предназначенные для регулирования мощности на однофазной нагрузке. Подробности модернизации описаны в разделе 2.4.

2.2 Методика проведения измерений

В стандартных экспериментах, посвященных измерению равновесных акустических свойств расплавов, исследуемый образец загружали в измерительную ячейку, после чего рабочий объем откачивали форвакуумным насосом до остаточного давления 10^{-2} мм рт. ст. Затем установку заполняли гелием и еще дважды повторяли вакуумирование системы и заполнение ее гелием для более полного удаления газовых примесей. Окончательное давление, при котором производились измерения акустических свойств, составляло 1 атм [47].

После того как атмосфера в рабочем объеме стабилизируется, приступали к нагреву образца. Чтобы избежать растрескивания кварцевого тигля, нагрев происходил с шагом 25 К с изотермической выдержкой на каждом шаге до 30 мин и средней скоростью нагрева 2 К/мин. Для улучшения акустического контакта с металлическим расплавом на торцы волноводов наносили слой индия.

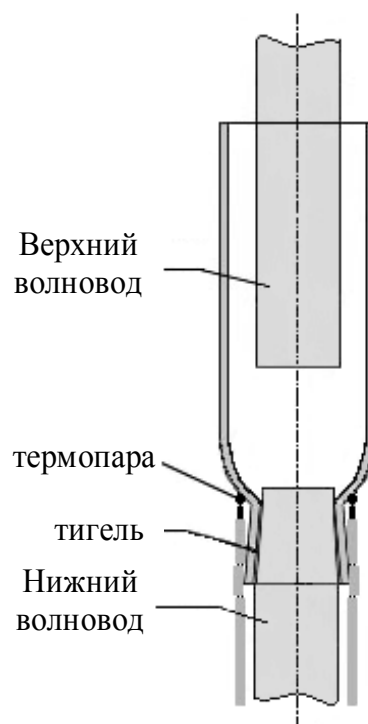


Рис. 8. Измерительная ячейка

Температуру контролировали с помощью двух хромель-алюмелевых термопар (рис. 6). Абсолютная погрешность определения температуры составляла ± 1 К. Измерения проводились как при нагреве, так и при последующем охлаждении с изотермическими выдержками в точках отсчета не менее 20 мин [47].

2.3 Источники и оценка экспериментальных погрешностей

Погрешность метода измерения скорости ультразвука может быть определена с помощью уравнения $v_s = (\Delta h / n) f$, из которого можно получить простую формулу для оценки относительной погрешности метода

$$\frac{\delta v_s}{v_s} = \sqrt{\left(\frac{\delta h}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{f}\right)^2}$$

Поскольку цена деления используемого индикаторного микрометра Tesa Digico-10 часового типа равна 0,001 мм, относительная погрешность $\delta h / \Delta h$ при Δh от 2 до 5 мм составляет от 0,25 до 0,1 %. При базовой частоте 31 МГц с паспортным разбросом частот в 50 Гц имеем $\frac{\delta f}{f} = 10^{-4}$ %. Таким образом, погрешность определения скорости звука зависит только от величины Δh .

Из уравнения $\alpha = -\frac{1}{h_2 - h_1} \ln \frac{A_2}{A_1}$ вытекает следующая формула для оценки относительной погрешности определения коэффициента поглощения α :

$$\frac{\delta \alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\delta A}{\Delta A}\right)^2 + \left(\frac{\delta h}{\Delta h}\right)^2}$$

Погрешности определения амплитуды ультразвукового сигнала δA и показаний индикаторного микрометра δh равны 0,5 и 0,005 мм,

соответственно. Величина Δh составляет около 20 мм, а ΔA при заданном значении Δh зависит от значения коэффициента поглощения α . Для жидких металлов α/f^2 имеет значение от $3 \cdot 10^{-15}$ до $10^{-14} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^2$. Подставив эти значения в уравнение $\alpha \approx -(1/A) \cdot (\Delta A/\Delta h)$, получим ΔA равное 2–5,5 мм. Тогда $\delta A/\Delta A = 4 - 12 \%$ и $\delta h/\Delta h = 0,03 \%$.

Таким образом, суммарная относительная погрешность эксперимента в определении скорости распространения звука составляет величину порядка 0,2 %. Подобная оценка для коэффициента поглощения звука дает величину погрешности около 8 %.

Погрешности становятся пренебрежимо малыми при выполнении условия $D/\lambda \geq 30$, где D – диаметр волновода. В наших опытах использовали волноводы из плавленого кварца диаметром $D = 14$ мм. Тогда при $f = 33$ МГц это условие будет выполняться.

Анализ относительных погрешностей результатов измерений акустических параметров, приведенный выше, является в некотором роде идеальным. В реальных условиях погрешности превышают приведенные выше значения за счет дополнительных источников, которые появляются из-за несовершенства конкретной методики или способов измерения. Например, возмущения температурного поля образца при перемещении волновода (особенно при высоких температурах) приводят к тому, что значение v_s , вычисленное по формуле 13, будет относиться к среднему значению температуры и может отличаться от показаний термопары [44]. Есть и конструкционные причины, увеличивающие погрешность. Например, затруднительно обеспечить строгую параллельность торцов обоих волноводов при их перемещении. Кроме того, при вращении микрометрического винта может наблюдаться прецессия верхнего волновода относительно оси нижнего.

Таким образом, разработанная методика и аппаратура позволяют измерять скорость распространения звука в металлах с высокими чувствительностью и точностью.

Как показано в [6], коэффициент поглощения звука может измеряться только в таких расплавах, в которых это поглощение ощутимо при частотах до 5 МГц.

2.4 Модернизация

Как указывалось выше, установка для измерения скорости и затухания ультразвука в металлических расплавах, описанная в предыдущей главе, была смонтирована в 1989 г. В эксплуатацию ее ввел в 2001 г. В.В.Филиппов. Впоследствии усилиями В.В.Филиппова, Д.А.Ягодина и Г.М.Сивкова установка была существенно модернизирована, что позволило с ее использованием решать целый ряд задач, перечисленных в предыдущем разделе. Однако к моменту начала данной работы (2014 г.) многие приборы и узлы пришли в негодность или морально устарели, что потребовало существенной модернизации установки.

Во-первых, необходимо было восстановить полностью акустический тракт, в котором пришли в негодность и волноводы измерительной ячейки, и резиновые уплотнения в конструкции холодильников для ее волноводов, и пьезоэлементы эталонной ячейки.

Во-вторых, не удовлетворяла работа нагревательной системы. Использувавшиеся ранее терморегуляторы РИФ-101, имели хорошие характеристики в управлении нагревом, но обладали значительной громоздкостью по сравнению с современными аналогами и не допускали цифрового управления.

В-третьих, эталонная ячейка, которая является хрупким по конструкции объектом, быстро изнашивалась вследствие неудачного расположения на рабочем столе экспериментатора.

В четвертых, из-за особенностей конструкции экспериментального комплекса трансформатор был вынесен в сторону от рабочего стола

экспериментатора, не имел надлежащей электрозащиты и удобного доступа для обслуживания.

Также можно отметить отсутствие пускателей для управления нагревом печи и работой вакуумных насосов, изношенность элементов системы охлаждения и ряд других, более мелких дефектов, требующих устранения.

В работе по улучшению экспериментального комплекса, продолжавшейся по настоящее время, наряду с автором, принимали участие Б.А.Русанов и работники кафедры физики и математического моделирования А.А.Сабирзянов, В.Е Сидоров и др.

Модернизация, прежде всего, коснулась систем управления и контроля работы нагревателя. Как указывалось выше, ранее управление температурой печи проводилось с использованием высокоточного регулятора температуры РИФ-101, состоящего из силового, регулирующего блоков и термостата с холодными концами термопары. Главное преимущество такой системы - возможность ступенчатого регулирования температуры с заданным шагом. Однако из-за значительных размеров каждого из рабочих блоков и отсутствия компьютерного управления мощностью, подаваемой на силовой трансформатор нагревателя, в дальнейшем нам пришлось отказаться от использования данной системы регулирования.

Вместо этого мы использовали силовые блоки МБТ1Ф160Т2, производимые предприятием «Термодат» и предназначенные для прецизионного регулирования мощности на однофазной нагрузке (рис. 10).

Блок-схема цепи управления мощностью представлена на рис.9.

Силовой блок имеет панель индикации с алфавитно-цифровым индикатором. Кнопки на этой панели позволяют выбирать режим работы.

Среднее значение выводимой мощности, в процентах от полной мощности нагревателя, определяется отношением времени включения к периоду ШИМ.

3) ШИМ+ФИУ. В этом случае регулирование происходит аналогичным обычному методу ШИМ образом, однако есть возможность ограничить максимальную мощность проходящих «пакетов». Прибор позволяет каждым из параметров управлять по любому из доступных входов управления.

В данной установке используется режим фазоимпульсного управления (ФИУ), который позволяет плавно изменять эффективное напряжение и мощность на нагрузке.

В случае аварийной ситуации (обрыв одной из фаз или размыкание входа запрета) ток на нагрузке отключается, при этом сохраняется доступ к настройкам. Кроме того данный силовой блок определяет, какая именно нештатная ситуация возникла.

Прибор рассчитан на работу с терморегулятором этого же производителя или с другими устройствами управления. В нашей системе измерения и регулирования температурой используется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор Термодат 12К5 - современный промышленный регулятор температуры с большим набором сервисных функций.

Этот прибор имеет развитую систему аварийной и предупредительной сигнализации, а именно: о превышении/снижении температуры, о неисправности датчика, о нарушении контура регулирования. Он обеспечивает высокую точность и стабильность измерений, предотвращает холодный пуск нагревателя. Имеется возможность плавно увеличивать подаваемую мощность. Универсальный вход позволяет подключать любые термопары. Кроме того, регулятор оснащен интерфейсом для управления с ПК и встроенной памятью для архивации измеренных данных с привязкой к реальному времени и календарю. Архив позволяет записать до 1 млн. точек.

Для удобства эксплуатации Термодат-12К5 имеет: три типа доступа к параметрам и настройкам, включая полный запрет на изменение параметров;

возможность ручного управления мощностью, подаваемой на нагреватель; ограничение максимальной и минимальной мощности; ограничение диапазона изменения температуры; корректировка показаний прибора (смещение характеристики термопары на постоянную величину), два вида таймера; десять режимов работы аварийной сигнализации, возможность блокировки аварийной сигнализации, в момент начального разогрева объекта; контроль обрыва датчика; функция защиты холодного нагревателя (плавное нарастание мощности при включении); контроль исправности контура регулирования по отсутствию теплового отклика при изменении мощности; фильтрация входных данных.

Основное преимущество перечисленных приборов состоит в том, что благодаря установке программного обеспечения на компьютер стало возможным цифровое управление мощностью и измерение текущей температуры в печи установки. Стала возможной и реализация записи в память прибора требуемой программы нагрева и охлаждения (ступенчато или в непрерывном режиме).

Наряду с перечисленными мероприятиями по модернизации схем регулирования температуры, изменены блоки управления приборами нагрева и измерения вакуума. Была создана панель управления этими блоками, в которой использовались только современные функциональные узлы и коммутационное оборудование (рис.10).



Рис. 10. Силовой блок МБТ1Ф160Т2 и щит управления

Блок пуска и управления форвакуумным насосом, силовым блоком и терморегулятором закреплён на текстолитовой пластине (рис. 11). Каркас трансформатора теперь имеет практичную конструкцию, позволяющую проводить работы по обслуживанию основных частей электроустановки в полном соответствии с требованиями электробезопасности.

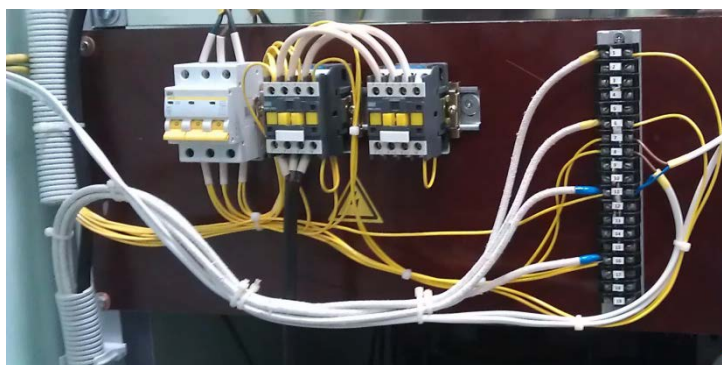


Рис. 11. Блок пуска и управления системой нагрева и вакуума

Система охлаждения также подверглась существенной модернизации. Специально изготовленный из нержавеющей стали шкаф, в котором расположен узел подачи холодной воды, позволяет экспериментатору беспрепятственно управлять ее напором отдельно в каждой части установки. Модернизированная установка представлена на рис. 12.

На измерительной ячейке вышли из строя волноводы. Они были заменены на такие же по конструкции. Совместно с Б.А.Русановым они были отшлифованы и прометаллизированы методом, который описывался во второй главе. На них были установлены пьезоэлементы ЦТС-19. Они выполнены из высокотемпературной пористой пьезокерамики, которая получена из синтезированных пьезокерамических материалов системы цирконата-титана свинца (ЦТС). Элементы из данных материалов применяют в высокочувствительных приемниках, излучателях звуковых и ультразвуковых колебаний относительно низкой мощности. Резонансная

частота используемых пьезоэлементов равна 33, 1 МГц. Они закреплены на вакуумную смазку. Аналогичным способом были заменены пьезоэлементы на эталонной ячейке. При сборке измерительной ячейки обнаружилась необходимость замены резиновых прокладок в холодильниках. Новые прокладки вырезали с помощью штангенциркуля, предварительно смазав резину вакуумной смазкой. Неровные края вырезанной прокладки обрабатывались с помощью напильника.



Рис. 12. Модернизированная установка по измерению скорости ультразвука импульсно-фазовым методом

Таким образом, в ходе модернизации установки были изменены:

- Система управления нагревом. Теперь имеется возможность цифрового управления, что позволяет разгрузить экспериментатора и повысить точность измерений.
- Щиты управления основными узлами. Коммутация произведена на отдельных текстолитовых пластинах, что позволило уменьшить

габариты некоторых узлов сделать более удобным процесс дальнейшего обслуживания.

- Подвес эталонной ячейки, который крепится на стенд с приборами. Это обеспечило безопасное хранение ячейки и удобный доступ к ней при обслуживании.
- Корпус для хранения трансформатора. Улучшение в безопасности в работе экспериментатора.

Кроме того, были заменены изношенные части установки.

Перечисленные мероприятия позволили оптимизировать работу оператора и сократить время проведения экспериментов. После указанной модернизации и последующих градуировочных опытов установка для измерения скорости и затухания ультразвука в расплавах может быть представлена к Государственной аттестации.

Выводы по 2 главе:

- 1) Описана конструкция установки по измерению скорости и затухания ультразвука импульсно-фазовым методом, а также методика подготовки и проведения экспериментов.
- 2) Указаны основные источники погрешностей при проведении измерений.
- 3) Перечислены мероприятия, выполненные для модернизации основных узлов экспериментального комплекса.

ГЛАВА 3. ОБУЧЕНИЕ ШКОЛЬНИКОВ ФИЗИКЕ ЧЕРЕЗ ПОГРУЖЕНИЕ В НАУЧНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

3.1 Содержание методики

Урал – металлургический край державы. Промышленность Свердловской области играет большую роль в социально-экономических сферах региона. Свердловская область относится к числу десяти основных регионов с высокой концентрацией производства, на долю которых приходится 45 процентов производимой в Российской Федерации промышленной продукции. Промышленность региона представляет собой крупный многоотраслевой комплекс, в структуре которого отмечается высокий удельный вес базовых отраслей - черной и цветной металлургии, машиностроения [49]. Устойчивое функционирование и развитие промышленности в условиях обостряющейся конкуренции на мировом рынке с учетом обеспечения импортозамещения, требует поиска технологий, которые позволят повысить эффективность производства уже освоенной продукции и разработать новые технологии производства изделий, изготавливаемых на их основе.

В настоящий момент в промышленном секторе Свердловской области имеется дефицит квалифицированных инженерных кадров. Существует острая нехватка подготовленных специалистов в области разработки и проектирования металлургических процессов. Доля специалистов высшего уровня квалификации составляет лишь 5 процентов от заявленной работодателями потребности. Нехватка квалифицированных специалистов наблюдается на всех этапах производства, начиная с технической подготовки и заканчивая эксплуатацией оборудования.

Стоит также отметить, что средний возраст высококвалифицированного инженерно-технического персонала составляет 53 года и выше.

Несмотря на сохраняющуюся в последние годы в Свердловской области тенденцию выбора экзамена по физике в рамках государственной итоговой аттестации не менее 25 процентами учащихся 11-х классов, общая численность абитуриентов, готовых поступать в высшие учебные заведения (далее - ВУЗ) Свердловской области для обучения по инженерным специальностям, а также численность выпускников ВУЗов, готовых прийти на предприятия Свердловской области для работы в качестве инженеров и конструкторов, не удовлетворяет запросам работодателей и ВУЗов Свердловской области.

Проблема заключается в отсутствии у обучающихся (выпускники школ, студенты младших курсов) осознанного стремления к получению образования по инженерным специальностям и рабочим профессиям технического профиля. Кроме того, в 2014 г. беспокойство вызывало и невысокое качество знаний абитуриентов по предметам естественнонаучного цикла и математике. Итоги сдачи ЕГЭ школьниками Свердловской области в том году: по физике – 48 баллов, математике – 46 баллов. Данные свидетельствуют о необходимости принятия дополнительных мер по повышению качества обучения.

Поэтому в октябре 2014 г. указом губернатора Свердловской области Куйвашевым Е.В. была утверждена Комплексная программа «Уральская инженерная школа» на 2015–2034 гг.

В рамках программы «Уральская инженерная школа» у нас возникла идея одного направления решения этой проблемы – обучение школьников физике через погружение в науку, тем более, что в институте имеются для этого все условия, в первую очередь – это научно-исследовательский центр «Расплав». Это позволит формировать у них осознанное стремление к получению образования по техническим специальностям, а значит и желание глубже изучать физику. Решение этой задачи можно осуществить через знакомство школьников со свойствами жидких металлов и с методами их исследования. Лаборатория НИЦ «Расплав» кафедры физики и

математического моделирования нашего института физики, технологии и экономики является уникальной научной площадкой в данном направлении не только для российских и зарубежных аспирантов технических вузов, но и для студентов нашего педагогического университета – будущих учителей физики.

Студенты, которые проявляют особый интерес к научной деятельности, имеют возможность проводить научные эксперименты, результаты которых важны для металлургической отрасли. Таким образом, еще являясь студентами, мы имеем возможность принимать участие в решении современных научных проблем.

Предварительный опрос учащихся показал, что они:

- не осознают роль науки для современного производства;
- имеют низкую мотивацию к изучению точных наук;
- не ориентированы на выбор инженерных профессий;
- имеют слабые представления об особенностях научной деятельности ученого или инженера-исследователя.

Предлагаемая нами МЕТОДИКА ПОГРУЖЕНИЯ В ФИЗИКУ ЧЕРЕЗ НАУКУ направлена на решение следующих задач:

- 1) пробудить в ребенке интерес к техническому образованию, инженерным дисциплинам и предметам естественно-научного цикла;
- 2) определить склонности и способности ребенка к изучению предметов этого цикла;
- 3) сформировать у учащихся навыки практической деятельности, необходимой для ведения исследовательских, лабораторных и конструкторских работ.

Данная методика реализуется в два этапа.

1 этап. Ознакомление учащихся с научной деятельностью

Шаг 1. 8-9 классы – проведение экскурсий в лаборатории кафедры методики преподавания физики, где осуществляется демонстрация

физических явлений на школьном оборудовании, и в НИЦ «Расплав», где они знакомятся с действующим научным оборудованием.

Результат – понимание отличий учебных лабораторий от научных, учебных опытов от научных экспериментов.

Шаг 2. 9-10 классы – знакомство с современными методами исследования свойств металлов.

Результат – пробуждение интереса к изучению физики, осознание необходимости повышения уровня знаний для участия в научных исследованиях.

Показывая установку 1, мы рассказываем учащимся **об импульсно-фазовом методе измерения скорости ультразвука**. Метод основан на наблюдения электрической интерференции двух сигналов, которые проходят через ячейку с исследуемым образцом и эталонную ячейку, где находится дистиллированная вода. На экране осциллографа наблюдается результат их интерференции после усиления. Расстояние между ближайшими максимумами и минимумами соответствуют длине ультразвуковой волны, а, зная с хорошей точностью частоту, мы можем рассчитать скорость звука по соотношению $v_s = \lambda f$.

Знание скорости ультразвука позволяет судить о физических характеристиках исследуемой среды. Ее измерения на ультразвуковых частотах позволяет с весьма малыми погрешностями определять, например, упругие постоянные металлов.

На установке 2 учащиеся знакомятся с измерениями плотности металлов и сплавов методом проникающего гамма-излучения (Русанов Б.А.). Эксперимент на данном установочном комплексе проходит в два этапа: на первом измеряется интенсивность пучка гамма-квантов, проходящего через «пустую» систему, в которой отсутствует исследуемый образец; на втором – количество импульсов, прошедших через исследуемый расплав.

Далее по формуле (3.1) вычисляется плотность вещества:

$$I = I_0 B e^{-\mu d l} \quad . \quad (3.1)$$

Здесь I , I_0 - интенсивности потока γ -квантов, регистрируемых детектором при наличии исследуемого образца и без него соответственно, B - фактор накопления, μ - массовый коэффициент ослабления гамма-квантов, d - плотность, l – толщина поглотителя.

Главное преимущество данных исследований заключается в том, что метод является бесконтактным. Установка прошла Государственную аттестацию. Отсюда следует, что данные полученные в ходе экспериментов, можно считать справочными.

2 этап. Занятия в научной лаборатории под контролем студентов старших курсов – сотрудников лаборатории, аспирантов.

Шаг 3. Участие старшеклассников/студентов первого курса в научных экспериментах.

Результат – подготовка доклада или реферата по физике.

Шаг 4. Самостоятельная проектная деятельность.

Результат – выполнение проекта на основе проведенных школьником экспериментов по исследованию свойств металлов одним из выбранных методов.

3.2 Реализация методики

Первый этап предлагаемой методики был реализован в период февраль – апрель 2016 г. с учащимися 7-10 классов школ г. Екатеринбурга, Талицы, Новоуральска, Асбеста.

На диаграммах представлены оценки значимости науки учащимися до и после экскурсии (рис. 13 и рис. 14 соответственно), результаты которых показали, что они проявили интерес к данным исследованиям, начали осознавать роль науки для современного производства, отличать учебную деятельность от научной. Содержание анкет:

Входная анкета

1. В каких, по Вашему мнению, отраслях промышленности применяются знания о тепловых явлениях (термодинамике)?
2. Как Вы думаете, есть ли потребность у человека применять теоретические знания по физике в повседневной жизни? Возможно ли это?
3. Как Вы считаете, возможно ли изучать физические свойства каких-либо объектов, не имея теоретического представления о них?
4. Какие свойства веществ Вам известны?
5. Как можно измерять плотности веществ, какими методами?
6. Что Вы знаете о звуке, об ультразвуке?
7. Как Вы думаете, в каких отраслях и для чего можно использовать ультразвук?

Итоговая анкета

1. Какие условия необходимы для изучения металла в жидком состоянии?
2. Какие свойства жидких металлов Вам известны?
3. Какие Вы знаете методы измерения плотности веществ?
4. Какими навыками в большей степени должен обладать экспериментатор (практическими или теоретическими)?
5. Сколько времени в среднем необходимо для проведения одного эксперимента, рассмотренного вами на экскурсии?
6. Являлась ли экскурсия полезной для вас?
7. Хотели бы вы в дальнейшем заниматься подобной научной деятельностью? Ответ поясните.

Каждый ответ учащихся оценивался в баллах (за один вопрос максимум 1 балл). Результаты анкет представлены в виде диаграмм рис. 11, рис. 12.

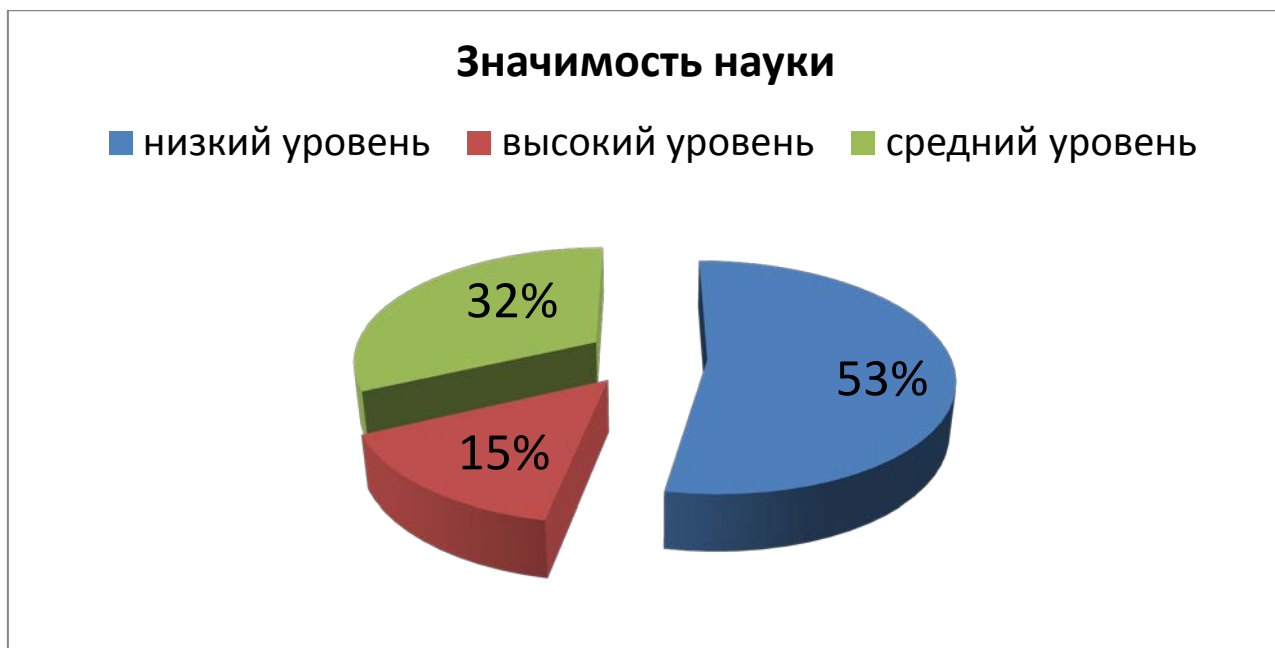


Рис. 13. Оценка значимости науки учащимися до экскурсии

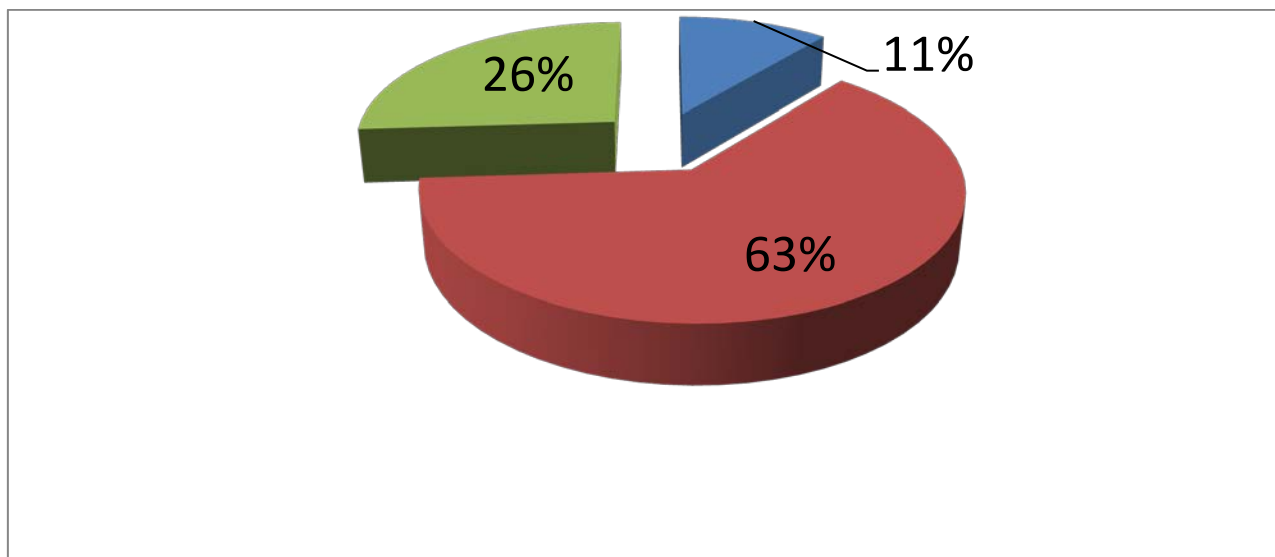


Рис. 14. Оценка значимости науки учащимися после экскурсии

Содержание экскурсии было использовано нами не только для закрепления пройденных тем по школьному курсу физики, но и как средство мотивации к углубленному изучению предмета и профориентации на рабочие профессии технического профиля и инженерные специальности.

Стоит отметить, что наиболее близкая по смыслу к данным исследованиям тема в учебном курсе физики - «Механические колебания и волны. Звук» - 9 класс.

После проведения педагогического эксперимента обозначились следующие моменты, которые можно оформить в виде методических рекомендаций:

На первом этапе:

- необходимо сделать акцент на современные разработки и их значимость на мировом уровне;
- содержание экскурсии должно быть приближено по уровню сложности к школьному курсу физики.

На втором этапе:

- целесообразно посвятить занятия подробному изложению методики измерений, познакомить учащихся с принципиальной схемой установки;
- в подготовке школьника к участию в научной деятельности нужно учитывать его индивидуальные особенности.

Планируемые результаты внедрения данной методики:

- **личностные**, включающие готовность и способность обучающихся к саморазвитию и личностному самоопределению, сформированность их мотивации к обучению и целенаправленной познавательной деятельности, способность ставить цели и строить жизненные планы;
- **метапредметные**, включающие освоенные обучающимися межпредметные понятия и универсальные учебные действия (регулятивные, познавательные, коммуникативные), способность их использования в учебной, познавательной и социальной практике, самостоятельность планирования и осуществления учебной деятельности и организации учебного сотрудничества с педагогами и студентами, построение индивидуальной образовательной траектории;
- **предметные**, включающие освоенные обучающимися в ходе изучения физики виды деятельности по получению новых знаний, их применение в учебно-проектных ситуациях, сформированные

представления об объективности научного знания, о системообразующей роли физики для развития техники и технологий, приобретение опыта применения научных методов познания, наблюдения физических явлений, проведения опытов, простых экспериментальных исследований, прямых и косвенных измерений с использованием аналоговых и цифровых измерительных приборов, понимание неизбежности погрешностей любых измерений, формирование научного типа мышления, научных представлений о ключевых теориях, владение научной терминологией, овладение основами безопасного использования оборудования.

Вышеперечисленные результаты соответствуют требованиям ФГОС.

Основные выводы к 3 главе:

1) Реализован 1 этап методики обучения. Опыт показал, что большинство учащихся усваивают содержание экскурсии и начинают осознавать значимость науки в современном мире, а некоторые из них проявили особый интерес к научным исследованиям в лаборатории «Расплав». С такими учащимися в будущем планируется перейти к реализации второго этапа предложенной методики.

2) Доказано, что проведение исследований в научной лаборатории вызывает потребность в углубленных знаниях по физике, в изучении конструкции экспериментальной установки и овладения методом измерения.

3) Можно утверждать, что учащиеся, которые пройдут через научную лабораторию как исследователи, выберут профессию инженера или ученого, то они это сделают осознанно, понимая как творческий характер научной деятельности, так и реальные трудности выполнения эксперимента при исследовании новых свойств физических объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования:

1) В хронологическом порядке рассмотрены основные методы измерений акустических параметров. Особое внимание уделено как прямым, так и косвенным методам измерения скорости ультразвука.

2) Освоены теоретические основы импульсно-фазового метода и устройство экспериментальной установки, действующей в НИЦ «Расплав» Института физики, технологии и экономики УрГПУ. Отработаны этапы подготовки к экспериментам, которые включают в себя: шлифовку волноводов и их металлизацию жидким индием методом ультразвуковой пайки, сборку каркаса экспериментального комплекса и освоение управления приборами.

3) Восстановлены и улучшены в ходе модернизации следующие основные узлы установки: система управления нагревом, которая теперь допускает возможность цифрового управления, щиты управления основными узлами, подвес эталонной ячейки, корпус для хранения трансформатора. По мнению автора, перечисленные мероприятия позволят оптимизировать работу экспериментатора, повысить точность измерений и уменьшить время проведения экспериментов.

4) Проанализированы трудности, ожидающие экспериментатора во время подготовки и проведения измерений. Выявлена главная проблема при проведении акустических опытов - обеспечение прохождения звукового сигнала по акустическому тракту. Показано, что при слабом и нестабильном выходном сигнале измерения затруднительны и расчетная погрешность измерений не соответствует действительности. Установлены взаимоисключающие требования, выполнение которых позволяет добиться достаточно сильного и стабильного сигнала.

5) Совместно с Б.А. Русановым проведены экскурсии для учащихся средних школ в НИЦ «Расплав». Содержание экскурсий было использовано не только для закрепления тем, пройденных в ходе изучения школьного

курса физики, но и для мотивации школьников к углубленному изучению предмета и профориентации на рабочие профессии технического профиля и инженерные специальности.

В дальнейшем автор планирует завершить модернизацию лабораторной ультразвуковой установки, провести градуировочные опыты по исследованию скорости ультразвука в ряде жидких металлов и подготовить установку к Государственной аттестации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Федеральный государственный образовательный стандарт основного общего образования» (утвержден приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 17 декабря 2010 г.) № 1897.
2. Комплексная программа «Уральская инженерная школа» на 2015-2034 годы (Указ Губернатора Свердловской области от 6 октября 2014 года) № 453-УГ.
3. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология. М.: Высшая школа, 2004. 504с.
4. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология. Москва: Металлургия, 2004. 91 с.
5. Байдов В.В., Дымов В. В., Кунин Л. Л., Михайлов И. Г. Методика измерения скорости ультразвука в расплавах // Ультразвуковая техника. 1965. № 2. С. 17–21.
6. Байдов В. В., Кунин Л. Л. Применение методов ультразвуки для исследования металлургических систем в жидком состоянии. // Теория металлургических процессов, 1995. Т. 40, С. 91–104.
7. Балдев Радж, В.Раджендран, П.Паланичами. Применения ультразвука. Москва: Техносфера, 2006. 124 с.
8. Баранов В. М. Ультразвуковые измерения в атомной технике. М.: Атомиздат, 2005. 264 с.
9. Бессонов М. В. Измерение скорости и поглощения ультразвука в расплавах при высоких температурах. Применение ультразвуки к исследованию вещества. М.: МОПИ, 2000. 146 с.
10. Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях. // Физическая акустика. / Под ред. У. Мезона М.: Мир, 1990, Т. 4Б, С. 204–326
11. Вебер Дж., Стефенс Р. Распространение звука в жидких металлах и сплавах. // Физическая акустика. / Под ред. У. Мезона. М.: Мир, 1990. Т. 4Б, С. 75–122.

12. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1999. 225 с.
13. Вьюгов П.М., Гуменюк В.С. Высокотемпературный ультразвуковой интерферометр // Украинский физический журнал. 1964. Т9, №7, С. 766-768.
14. Гитис М.Б., Кунин Л.Л., Михайлов И.Г. Методика измерения скорости ультразвука в расплавах // Ультразвуковая техника. 1965. С. 21-25.
15. Гитис М.Б. Михайлов И.Г. Распространение звука в жидких металлах // Акуст.ж. 1996. Т.12, №1, С.145-449.
16. Гитис М.Б., Химуни А.С. О дифракционных эффектах в ультразвуковых измерениях // Акустический ж., 1998. Т.14, №4, с. 489-512.
17. Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки. М.: Высш. шк., 1989. 576 с.
18. Голямина И. П. Ультразвук. Москва: Советская энциклопедия, 1989. 506 с.
19. Илгунас В., Яронис Э., Сукацкас В., Ультразвуковые интерферометры. Вильнюс, 2003. 115 с.
20. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. (2-е изд.). М.: Высш. школа, 2008. 190 с.
21. Ким С. Г. Молекулярная акустика жидких полиметаллов и полупроводников. Москва, 1991. 244 с.
22. Ким С. Г., Тимошенко В. И., Павлова Л. М. Физико-химический анализ расплавов бинарных систем с полупроводниковыми фазами акустическим методом . 3 кн.: Материалы электронной техники, 1994. 149 с.
23. Колесников А. Е., Ультразвуковые измерения, 2 изд., М., 2002. 205 с.
24. Компанеев А.С. Ударные волны. М.: ГИФМЛ, 2003. 98 с.
25. Конюченко Г. В. Измерение скорости ультразвука при плавлении некоторых поливалентных металлов и её связь со структурой и теплофизическими свойствами электронных расплавов: Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

- Камышин: Камышинское высшее военное строительное училище, 1990, 136 с.
26. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 417 с.
27. Крауткремер Й., Крауткремер Г., Ультразвуковой контроль материалов. 2006. 322 с.
28. Круглов Л. Д., Шкарлет Ю. М., Вертман А. А., Шнырев Г. Д. Возбуждение ультразвуковых колебаний в металлах при высоких температурах электромагнитно-акустическим преобразователем. // Дефектоскопия, 1972, № 4, С. 31–37.
29. Лайтхилл М. Дж. (ред.) Нелинейная теория распространения волн. М.: Мир, 2000. 140 с.
30. Лашевич Т. А. Экспериментально методические основы молекулярной акустики жидких металлов и сплавов М.: Мир, 1999. 169 с.
31. Магомедов Ф. М., Исмаилов М. А., Пашаев Б. П. Скорость ультразвука и сжимаемость бинарных сплавов системы висмут-галлий. // ТВТ, 1995, Т. 13, № 5, С. 1106–1108
32. Мандельштам Л. И., Леонтович М. А. К теории поглощения звука в жидкостях. // ЖЭТФ, 1987, Т. 7, № 3, С. 438–449.
33. Морз Ф. Колебания и звук. М.: ГИТТЛ, 1999. 200 с.
34. Ноздрев В.Ф. Применение ультраакустики в молекулярной физике. Государственное издательство физико-математической литературы, Москва, 1998. 456 с.
35. Пасынков Р. Е. Пьезоэлектрические материалы.// Ультразвук. М.: Советская энциклопедия, 1979. С. 278–282.
36. Пашаев Б.П. Плотность, скорость ультразвука, электро- и теплопроводность легкоплавких многовалентных металлов в жидком состоянии. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. М.: ИВТАН, 2002. 108 с.

- 37.Пашук Е. Г., Пашев Б. П. .Исследование скорости ультразвука в металлических расплавах в широком интервале температур. // ТВТ, 1980, Т. 18, № 2, С. 312–316.
- 38.Пейн Г. Физика колебаний и волн. М.: Мир, 2009. 134 с.
- 39.Полоцкий И. Г., Ходов З. Л. Ультразвуковой интерферометр для измерений при повышенных температурах. // Вопросы физики металлов, 1955, № 6, С. 70–76.
- 40.Судзуки Т. Основные типы пьезоэлектрических преобразователей. Под ред. Е. Кикучи. М.: Мир, 1972. 281 с.
- 41.Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 308 с.
- 42.Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В., Применение ультразвука в промышленности// Электронный курс, 2010.
- 43.Чернов Л.А. Волны в случайно-неоднородных средах. М.: Наука, 2007. 112 с.
- 44.Шоно А. А., Никонов А. М., Богданов В. Н. Некоторые вопросы электронного обеспечения ультразвукового интерферометра для работы с расплавами стекла. Научные труды высших учебных заведений Литовской ССР, Ультразвук, 1999, № 11, 100 с.
- 45.Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. // Л.: ЛГУ, 1980, 280 с.
- 46.Шляпников В. В. Экспериментальные исследования скорости и поглощения звука в широком интервале изменения параметров состояния, включая критическую область: Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. М.: МОПИ, 1970, 200 с.
- 47.Ягодин Д.А. Исследование структурной неоднородности расплавов Ga-Bi и Pd-Si методами акустометрии и гамма-денситометрии: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Екатеринбург, 2007. 162 с.
- 48.Яронис Э., Илгунас В., Сукацкас В., Ультразвуковые интерферометры. Вильнюс, 1993. 161 с.

49. Яцык С.И., Филиппов С. И. Совершенствование импульсного метода и акустические исследования расплавов металлов рыхлой структуры. // Изв. ВУЗов, черная металлургия, 1998. 104 с.
50. Физический энциклопедический словарь. / Под ред. А. М. Прохорова. // М.: Академия, 2010. 945 с.
51. Филонович С.Р. Классики физической науки. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.
52. Дополнительное оборудование к приборам термодат [Электронный ресурс]. URL:
http://prominstrument.oml.ru/dopolnitelnoe_oborudovanie_k_pribor
53. Прайс-лист на приборы Термодат [Электронный ресурс]. URL:
<http://pandia.ru/text/78/279/78863-10.php>